

地球科学

# 加拿大萨德伯里奈恩地区镁铁-超镁铁岩体特征及其成矿机制

胥迎红<sup>1,2</sup> 王京彬<sup>2</sup> 宋谢炎<sup>3</sup> 王向兰<sup>4</sup> 陈列锰<sup>3</sup> 于宋月<sup>3</sup>

(中国地质大学(北京)<sup>1</sup>, 北京 100083; 北京矿产地质研究院<sup>2</sup>, 北京 100012;

中国科学院地球化学研究所<sup>3</sup>, 贵州 550002; 有色金属矿产地质调查中心<sup>4</sup>, 北京 100012)

**摘要** 加拿大萨德伯里(Sudbury)地区分布一种成因上与萨德伯里陨石撞击事件无关的岩浆铜镍硫化物矿床。该类矿床的形成受古元古代尼帕辛(Nipissing)镁铁-超镁铁侵入岩套控制,其中以莎士比亚(Shakespeare)矿床和奈恩(Naim)矿床为典型。奈恩岩体在地表出露I号和II号两个岩体,呈北东走向岩墙式分布,在深部二者合并为一个整体。奈恩岩体的岩浆分异性好,从岩体底部至顶部具有明显的岩相分带,下部辉石岩相和中部苏长辉长岩相为主要含矿岩相。辉石岩中发育块状-半块状铜镍硫化物;苏长辉长岩中发育浸染状-星散状铜镍硫化物。奈恩岩体中各岩石单元属于钙碱性系列。根据 $(Mg / < Fe >)$ 对 $(Mg + < Fe >)$ /Si变异图、 $(Mg + Fe)$ /Ti-Si/Ti图解、 $(Na_2O + K_2O)$ 对SiO<sub>2</sub>变异图、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>对SiO<sub>2</sub>变异图、FMC图解,奈恩岩体属于镁铁-铁镁质、低铝、弱碱质和低钙(贫钙)岩体。奈恩地区成矿机制概括为四个岩浆演化阶段,第一、第二阶段中的含硫围岩混染作用、双扩散对流作用,对岩浆分异和含硫岩浆的熔离起了重要作用,铜镍硫化物的最终形成主要是在第三和第四阶段完成。

**关键词** 萨德伯里 奈恩岩体 岩相分带 铜镍硫化物 岩浆分异 成矿机制

中图法分类号 P612; 文献标志码 A

加拿大萨德伯里(Sudbury)地区由于发育陨石撞击成因的岩浆铜镍硫化物矿床(简称萨德伯里铜镍硫化物矿床)而闻名于世。该类型矿床形成于约1 850 Ma<sup>[1,2]</sup>,矿床规模和经济效益均巨大,因而为世人所熟知。但是,该区除了发育典型的萨德伯里铜镍硫化物矿床外,还发育了另外一种与陨石撞击事件无关的岩浆铜镍硫化物矿床,该类矿床受区域上古元古代尼帕辛(Nipissing)镁铁-超镁铁侵入岩套控制,矿床形成于约2 219 Ma<sup>[2,3]</sup>。目前该类型矿床的科研和勘查工作程度较低,已发现矿床的规模较小,因而大家对此了解较少,但是该类型矿床未来仍有寻找大型-超大型铜镍矿的潜力。

尼帕辛镁铁-超镁铁侵入岩套发育大量铜镍硫化物矿化,该类型矿化形成的矿床品位较低,但可形成具有一定规模和经济意义的矿床。其中以莎士比亚(Shakespeare)岩体形成的莎士比亚铜镍硫化物矿床最为典型。莎士比亚矿床已探获矿石量

1126.6 × 10<sup>4</sup>吨,其中金属元素的总体品位为: Ni 0.33 wt% ,Cu 0.35 wt% ,Co 0.02 wt% ,(Pd + Pt) 0.69g/t ,Au 0.19 g/t<sup>[4]</sup>。研究区(即奈恩地区)位于莎士比亚铜镍硫化物矿床南东方向约13 km处。下面以奈恩地区为例,对尼帕辛镁铁-超镁铁侵入岩套控制的岩浆铜镍硫化物矿床地质特征、岩相分布特征、矿化特征、岩石地球化学特征及成矿机制进行论述。

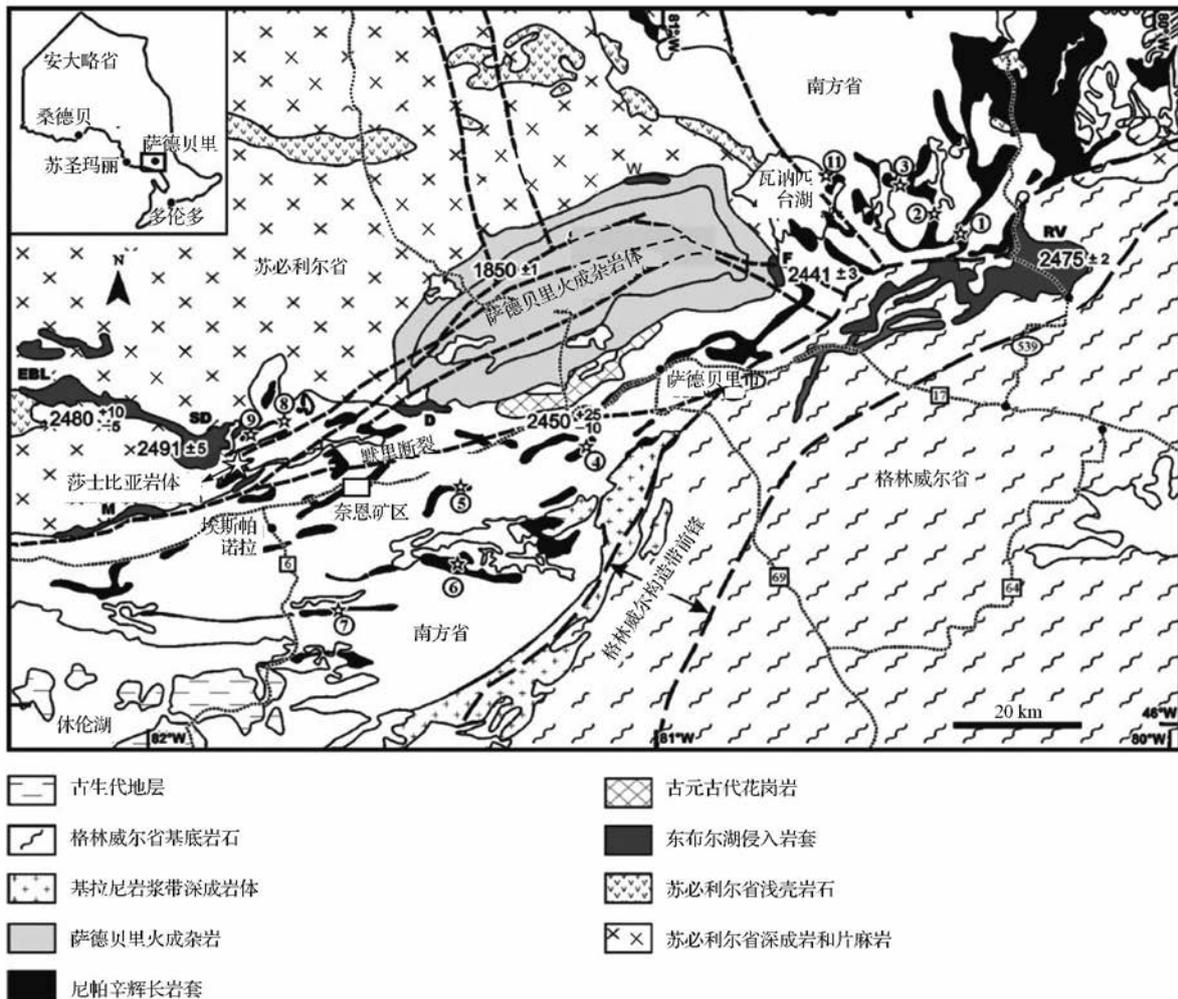
## 1 区域地质

奈恩地区位于加拿大地盾中部,处于苏必利尔地质省(Superior Province)南缘与南方地质省(Southern Province)交汇部位(图1),经历了这两个地质省元古代时期相互作用的地质活动演化史。南方地质省东南方向紧邻格林威尔地质省(Glenville Province)(图1)。苏必利尔地质省基岩主要以太古代长英质深成岩体为主,南方地质省基岩以古元古代休伦统(Huronian Supergroup)上地壳岩石为主,格林威尔地质省基岩以中元古代花岗岩质片麻岩为主。所有基岩被东布尔湖镁铁侵入岩套(East Bull Lake Suite)、尼帕辛镁铁-超镁铁侵入岩套和萨德伯里火成杂岩体等几个不同时代的镁铁-超镁铁侵入岩套切割。

2015年8月14日收到

国外矿产资源风险勘查专项  
(10254B007)资助

第一作者简介:胥迎红(1981—),男,工程师,博士研究生。研究方向:有色金属矿床学。E-mail: henryxu7283@163.com。



图中数字代表尼帕辛侵入岩套中的各矿化点位置: ①: 筒岩体; ②: 戴维斯-凯利岩体; ③: 凯利岩体; ④: 马卡达湖岩体; ⑤: 路易斯湖岩体; ⑥: 莱克帕奈什岩体; ⑦: 卡森湖岩体; ⑧: 大天鹅岩体; ⑨: 昂布莱恩岩体; 图中也展示了东布尔湖侵入岩套中矿化岩体的位置并用字母缩写标记: RV: 里弗瓦利岩体; D: 德鲁里镇岩体; W: 温斯特镇岩体; F: 猎鹰桥岩体; SD: 阿格纽湖岩体; EBL: 东布尔湖岩体; 修改自 Sproule *et al*<sup>[4]</sup>

图1 安大略省萨德伯里地区地质简图

Fig. 1 Simplified geological map of the Sudbury region, Canada

尼帕辛镁铁-超镁铁侵入岩套主要以岩脉或岩床形式(大约90%)出露在早元古代休伦统变质沉积岩中(2.45~2.2 Ga)<sup>[1-3, 5-7]</sup>(图1)。整个尼帕辛镁铁-超镁铁侵入岩套从苏圣玛丽(Sault Ste. Marie)经过萨德伯里地区一直延伸到克波特(Cobalt)地区,呈狭长带状分布,东西向延伸达450 km,岩带出露宽度变化范围较大,20~150 km不等,岩套总体积大于104 km<sup>3</sup>,其规模虽然不能与中生代和现代的大陆溢流玄武岩相比(如非洲的Karoo火成岩省,西伯利亚大火成岩省),但仍被认为是元古代大陆溢流玄武岩省的残留(2.21~2.22 Ga)<sup>[8]</sup>。

## 2 岩体产出与分布

奈恩岩体位于萨德伯里火成杂岩体南西方向约20 km处(图1),属于尼帕辛岩套的一部分,侵位于

2.45~2.2 Ga的休伦统(Huronian Supergroup)的长石英砂岩、含砾砂岩、浅变质细砂岩中(图2)。参考邻区莎士比亚矿床测试年龄数据<sup>[4]</sup>,推测奈恩侵入体形成时间约为2219 Ma。奈恩岩体虽然遭受了后期的变质作用和构造作用,但岩体的基本形态依然保存完好。奈恩岩体在地表由I号(北岩体)和II号(南岩体)岩体组成(图2)。但激电测深剖面解译资料显示,I号岩体和II号岩体在深部合为一个岩体,这与岩相分布规律也基本一致。I、II号岩体在深部合为整体后,岩体产状区域缓倾。

I号岩体地貌较为低缓,总体呈NE-SW走向岩脉产出,倾向SE,倾角为60°~70°。I号岩体沿走向延伸约9 km,岩体厚度约400 m,但在该岩体东北部该岩体呈重叠状,厚度增大为约800 m。I号岩体

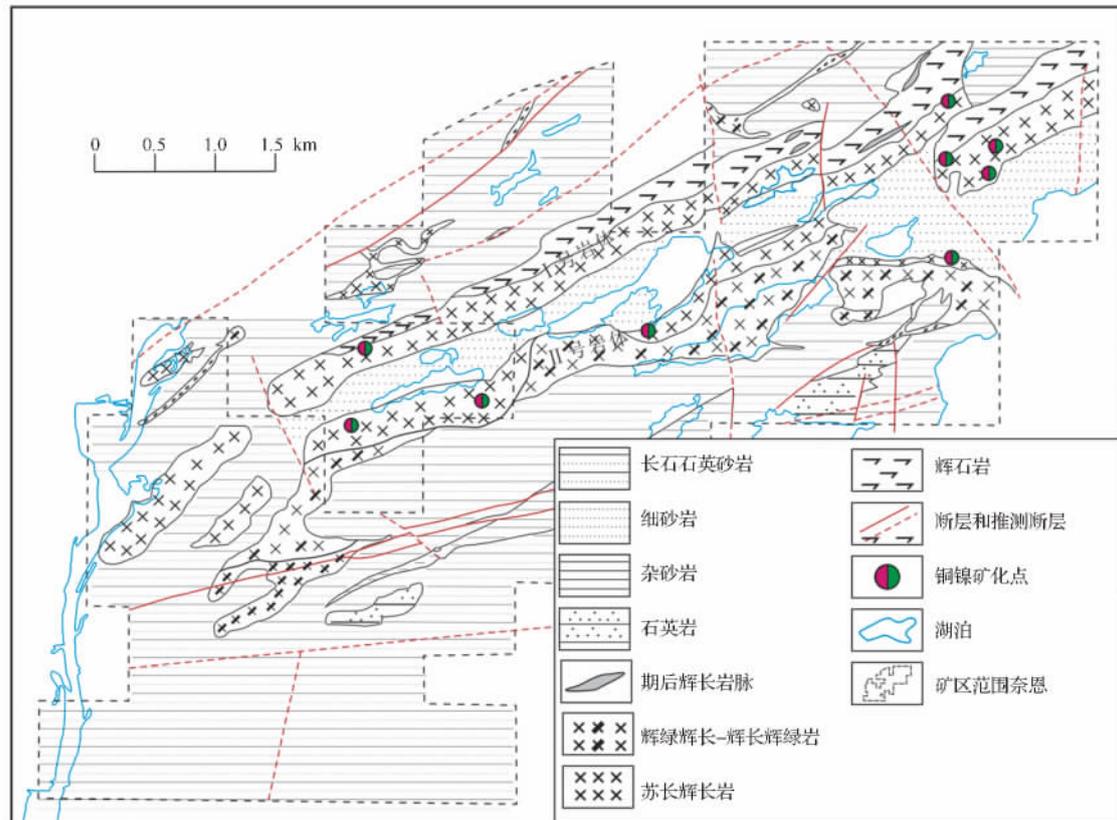


图2 加拿大萨德伯里奈恩地区地质简图

Fig. 2 Simplified geological map of the Nairn Area, Sudbury, Canada

内岩石单元主要包括辉绿岩、辉石岩、苏长辉长岩。其中,辉石岩和苏长辉长岩内多发育铜镍硫化物矿化。地表出露矿化点主要分布在辉石岩与苏长辉长岩的接触带部位或者苏长辉长岩单元内部,接触带部位 Cu-Ni 矿化品位比苏长辉长岩单元内部的矿化品位更高。

II号岩体地貌较陡,总体也呈岩脉产出,但产状略有变化,南西端呈近 NE-SW 走向,北东端呈弧状逐渐向南东弯曲,倾向也随之由 SE 逐渐变为 S,倾角较 I 号岩体略缓一些,为  $50^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 。II号岩体沿走向延伸约 5 km,厚度 300 ~ 500 m 之间变化。II号岩体内岩石单元主要包括苏长岩辉长岩、辉绿辉长岩-辉长辉绿岩、少量辉绿岩。在 II 号岩体苏长辉长岩内也发育少量铜镍硫化物。

奈恩岩体的北部和南部都出露了一些不规则形态的小岩体,平面上呈环状、弧状、水波状等形态。这些不规则形态的岩体均为奈恩岩体的一部分,出露形态主要受地表剥蚀影响。

奈恩地区发育三组断裂,包括 NE 向断裂、近 SN 向右旋平移断裂和 NW 向断裂,后两组断裂分别切 NE 向断裂。NE 向断裂为岩浆期构造,主要表现为奈恩岩体侵入填充,多数断裂在地表没有明显断

裂特征。SN 向右旋平移断裂和 NW 向断裂均为岩浆期后构造活动,对奈恩岩体具有破坏作用,尤其 I 号岩体北东部表现尤为明显。

### 3 岩体侵入相分带

奈恩岩体岩相分带性较好,从顶部至底部依次为:顶部辉绿岩、辉绿辉长岩-辉长辉绿岩、浅色-暗色苏长辉长岩、辉石岩、底部辉绿岩组成(图 3)。岩相分带在 I 号、II 号两个岩体中并没有重复,说明这两条岩体是岩浆侵入后作为一个整体分带的结果,而不是岩浆同时侵入在不同位置形成的两条独立岩体。上文提到 I 号、II 号两个岩体在深部为一个整体,奈恩岩体的岩相分布规律为该观点提供了佐证。顶部辉绿岩、辉绿辉长岩-辉长辉绿岩主要位于 II 号岩体,浅色-暗色苏长辉长岩、辉石岩、底部辉绿岩主要位于 I 号岩体。铜镍硫化物主要分布在浅色-暗色苏长辉长岩、辉石岩两个岩相单元内。浅色-暗色苏长辉长岩内主要发育浸染状铜镍硫化物矿化,辉石岩内主要发育半块状-块状铜镍硫化物矿化(图 3)。

奈恩岩体的岩相分带与区域上尼帕辛侵入岩套的岩相分带基本一致<sup>[9,10]</sup>,但缺失了尼帕辛岩套中

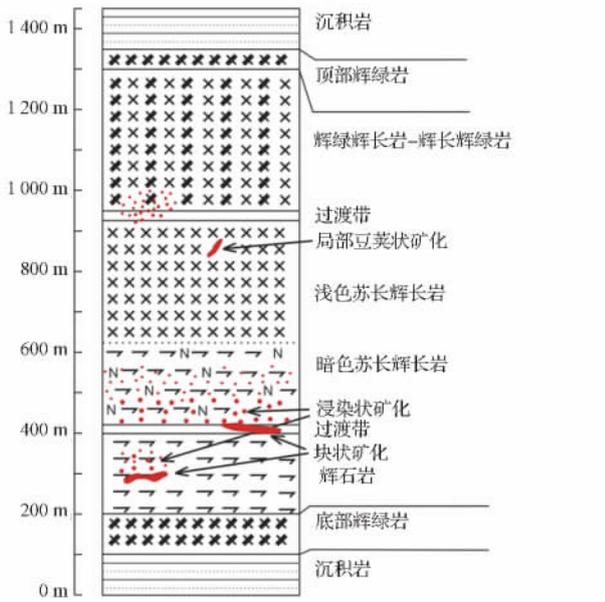


图3 奈恩岩体岩相分带柱状图

Fig. 3 Lithofacies belt histogram of the Nairn intrusion

典型的花斑状辉长岩。另外,在岩石命名中也略有不同,这里命名的辉绿辉长-辉长辉绿岩与尼帕辛其他侵入岩中变化结构辉长岩( *vari-texture gabbro* )基本一致;暗色苏长辉长岩与尼帕辛侵入岩中辉石辉长岩( *hypersthene gabbro* )基本一致<sup>[9,10]</sup>。

奈恩岩体各岩相分带特征如下。

(1) 顶部辉绿岩位于奈恩岩体顶部,在奈恩地区西部和东南部Ⅱ号岩体南缘出露较多。顶部辉绿岩相厚度较小,且变化较大,一般在十几米至几十米之间变化,局部可达到100 m左右。该岩相带内基本不含硫化物矿化。该岩相内岩石矿物粒度较小,主要为微粒结构,局部为细粒结构,岩石主要由斜长石、辉石和少量石英、角闪石、黑云母组成。斜长石含量约50%,呈半自形板状,杂乱分布,粒度0.1~1 mm,轻高岭土化、绢云母化,有的隐约可见环带。辉石含量约40%,呈半自形柱粒状,为单斜辉石、斜方辉石两种,似填隙状分布于斜长石粒间,部分粒内包嵌板状斜长石,构成似辉绿结构,粒度一般0.1~1 mm,少数2 mm左右,部分为次闪石等交代。岩内多见1%~5%的石英,呈它形粒状,填隙状分布[图4(a)]。

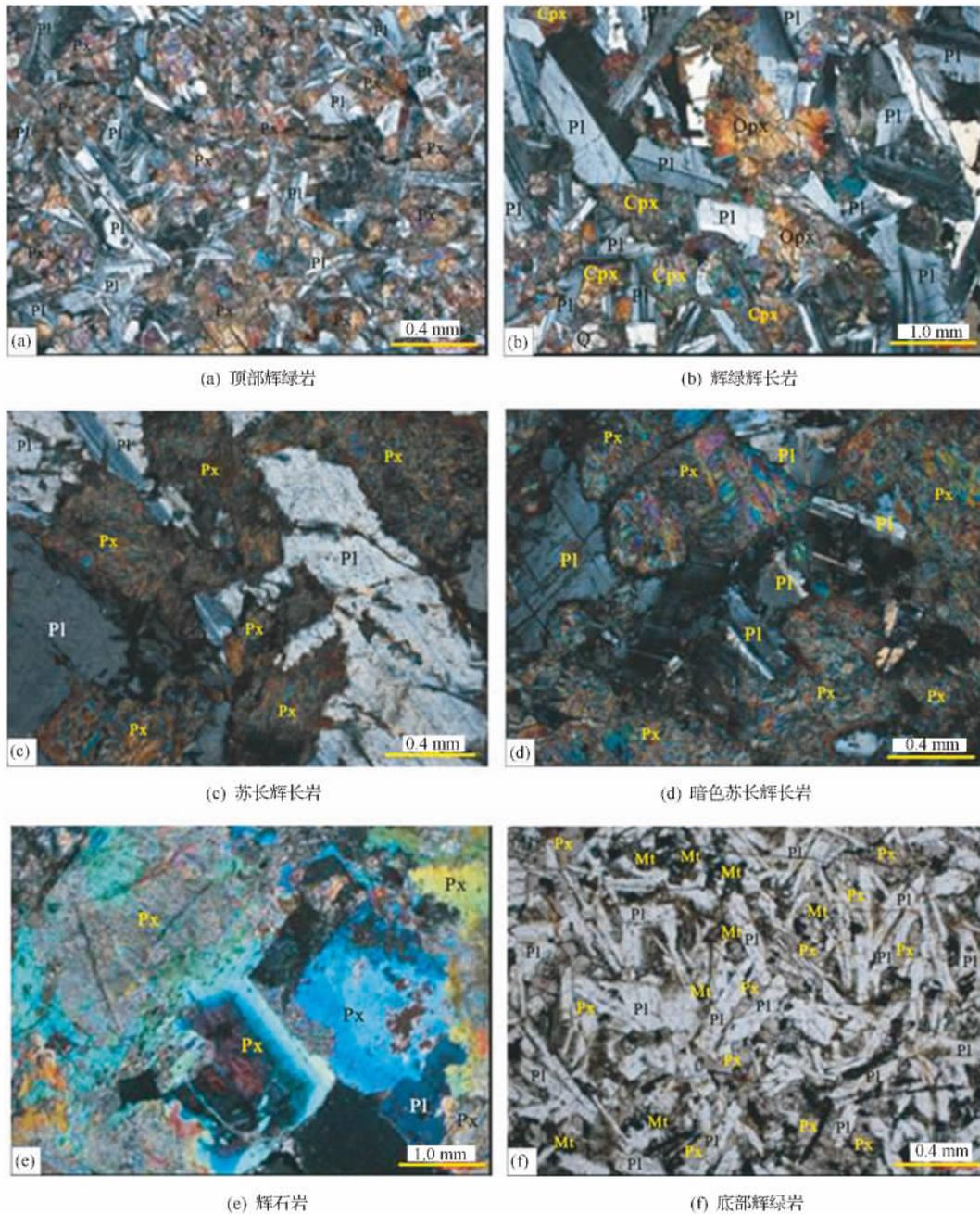
(2) 辉绿辉长-辉长辉绿岩位于顶部辉绿岩下部,属于奈恩岩体上部单元,是地表Ⅱ号岩体主要组成部分。该岩相单元厚度较大,一般在200~350 m之间变化。该岩相单元主要为辉长岩与辉绿岩过渡类型,岩石结构变化不一,这也是国外一些地质学者把该岩相单元命名为变化结构辉长岩的原因。该岩相内岩石组成与辉绿岩相似,但矿物粒度增大,以细

粒结构为主,局部为微粒结构,并且发育似辉长辉绿结构或辉绿辉长结构[图4(b)]。该岩相内局部发育星散状铜镍硫化物矿化。在该岩相带内局部发育闪长岩脉,岩石组成为暗色矿物单斜辉石和角闪石、浅色矿物基性斜长石,其中斜长石含量大于80%,大量自形斜长石之间的空隙被少量半自形单斜辉石所充填。

(3) 浅色-暗色苏长辉长岩位于奈恩岩体的中部,辉绿辉长-辉长辉绿岩岩相单元下部,地表主要出露在Ⅰ号岩体上部和Ⅱ号岩体的下部。与辉绿辉长-辉长辉绿岩为过渡渐变接触,接触带宽几十厘米至几米不等。在该岩相带内常见到浸染状铜镍硫化物,局部见到豆荚状块状铜镍硫化物。铜镍硫化物常与磁铁矿紧密共生。该岩相带厚度较大,地表出露厚度为200~300 m,延伸到深部后厚度可能达到550 m左右。浅色苏长辉长岩和暗色苏长辉长岩之间没有明显过渡界线,为渐变过渡状。宏观上浅色苏长辉长岩位于暗色苏长辉长岩上部,并且厚度大于暗色苏长辉长岩。该岩相内岩石粒度明显变大,但仍以细粒结构为主,局部为中粒结构[图4(c)和图4(d)]。浅色苏长辉长岩和暗色苏长辉长岩的岩石组成相似,主要由斜长石、辉石等组成,但是在暗色矿物和浅色矿物的比例上有所差别。暗色苏长辉长岩呈灰黑色,主要组成矿物包括单斜辉石(40%~60%)、斜方辉石(10%~20%)和斜长石(15%~30%)[图4(c)],矿物含量在垂向上变化不明显。浅色苏长辉长岩的斜长石含量明显增多至50%~70%,而辉石含量相应减少至30%~50%左右[图4(d)]。

(4) 辉石岩属于奈恩岩体下部单元,位于Ⅰ号岩体苏长辉长岩单元下部,地表主要出露在Ⅰ号岩体北部。与苏长辉长岩为过渡渐变接触,接触带一般宽几十厘米不等。该岩相单元厚度较大且变化稳定,一般在200~300 m之间变化。该岩相单元发育沿裂隙、断裂分布的铜镍硫化物。岩石呈半自形细粒状结构,块状构造。岩石内辉石含量多在85%~95%之间变化,多发生次闪石化、绿泥石化[图4(e)]。

(5) 底部辉绿岩属于奈恩岩体最底部单元,位于Ⅰ号岩体辉石岩单元下部,地表主要出露在Ⅰ号岩体北缘。该岩相带厚度一般在几十米至100 m。岩相内基本不含铜镍硫化物。底部辉绿岩发育典型辉绿结构,矿物粒度较小,以微粒-细粒结构为主[图4(f)]。岩石组成上与顶部辉绿岩有所变化,暗色矿物含量较顶部辉绿岩有所增加,局部发育橄榄石,而斜长石含量有所减少。



Px 为辉石, Cpx 为单斜辉石, Opx 为斜方辉石, Pl 为斜长石, Qtz 为石英, Mag 为磁铁矿

图 4 奈恩岩体中样品的矿物组成和结构镜下照片

Fig. 4 Microscopic photos of sample's mineral composition and texture of the Naim intrusion

根据以上特征分析认为,奈恩岩体的岩浆分异良好,与邻区莎士比亚矿床分异相似,岩浆硫化物矿化分布在中部浅色-暗色苏长辉长岩和下部辉石岩中,说明在奈恩岩体中部、下部有寻找一定规模岩浆铜镍硫化物矿的潜力。

#### 4 矿床类型及矿化特征

根据奈恩岩体的岩相分布规律及铜镍硫化物分布特征认为,奈恩矿床属于岩浆在地表浅部就地熔离成

矿<sup>[11-14]</sup>。铜镍硫化物在该区东部和西部最为发育。目前发现的铜镍矿化体规模较小,长数米至几十米,厚 1 m 至十几米。多呈不规则透镜状沿走向和倾向具明显的膨缩变化及分枝复合。矿化体一般分布在岩体中下部的苏长辉长岩和岩体下部辉石岩内。相比较辉石岩内矿化体,分布在苏长辉长岩内矿化体规模较大,矿石呈浸染状构造,铜镍矿化品位中等,均在 0.2% ~ 0.6% 之间变化。该类矿化体与所在岩相之间没有明显界线,呈渐变过渡状态。分布在苏长辉长岩与辉石

岩接触面上或辉石岩内的矿化体规模较小,矿石呈块状构造,铜镍矿化品位较高,均在 1%~3% 之间变化。该类矿化体呈小透镜体或条带状与辉石岩有明显界线。两种类型矿化体一般不同时出现。

浸染状矿石内金属硫化物呈半自形至他形粒状,金属硫化物集合体呈 0.1~3 mm 大小,一般为不规则星点或液滴状,均匀地充填于斜长石、辉石等矿物晶间。部分矿化体矿石内硫化物呈斑杂状,以大小不等颗粒的集合体形式出现,推测为后期岩浆热液叠加作用造成。金属硫化物矿物中以磁黄铁矿、黄铜矿和镍黄铁矿为主,其中磁黄铁矿含量占硫化物 80%~90%,黄铜矿占 1%~15%,镍黄铁矿占 0%~10%。另外,金属硫化物中有时含少量方黄铜矿、硫钴矿、钛磁铁矿。

与浸染状矿石相比,块状矿石中除了金属硫化物含量明显增加外,不同金属硫化物矿物的形态和含量发生变化。磁黄铁矿通常为半自形晶,粒度较大(0.5~3 mm),含量占硫化物的 80%~95%;镍黄铁矿为半自形-它形晶,粒度在 0.2~1 mm 之间,含量占硫化物的 2%~15%,与磁黄铁矿紧密共生或被磁黄铁矿包含其中;黄铜矿呈它形晶,含量最低,在硫化物中含量 <5%,一般填充于其他矿物之间或者交代磁黄铁矿。结构关系说明磁黄铁矿和镍黄铁矿结晶较早,而黄铜矿结晶最晚。

### 5 岩石地球化学特征

本次研究工作中,针对奈恩地区 I 号岩体、II 号岩体的典型岩相分带,分别在不同岩石单元采集了地表样品和少量钻孔岩心样品进行全岩主量元素进行分析测试。

#### 5.1 岩浆系列

根据 Irvine 的碱度系列划分图解<sup>[15]</sup>(图 5),奈恩岩体的辉石岩、苏长辉长岩、辉绿辉长岩-辉长辉绿岩属于亚碱性系列,而期后形成的细粒-微粒辉长岩脉属于碱性系列,但偏亚碱性系列。

又根据  $w(\text{FeO}) / [w(\text{MgO}-\text{SiO}_2)]$  图解<sup>[15]</sup>(图 6),奈恩岩体的辉石岩、苏长辉长岩、辉绿辉长岩-辉长辉绿岩属于钙碱性系列,其中有两个辉绿辉长岩样品位于拉斑玄武岩系列和钙碱性系列的过渡带中,这两个样品位于地表 II 号岩体的边部,推测为岩浆混染的结果。而期后形成的细粒-微粒的辉长岩脉属于拉斑玄武岩系列。 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  全部转化为  $\text{FeO}$ ,调整方法为:  $\text{FeO} = 0.8998\text{Fe}_2\text{O}_3$ <sup>[16]</sup>。

#### 5.2 岩石化学特征

奈恩岩体各类岩石的平均化学成分见表 1。岩体中  $\text{SiO}_2$  的含量为 45.6%~57.6%, $\text{Na}_2\text{O}$  的含量为

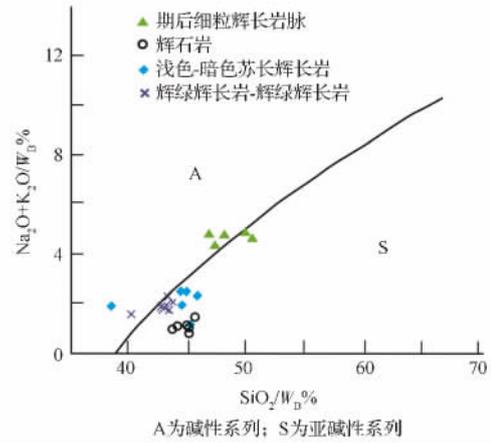


图 5 (K<sub>2</sub>O + Na<sub>2</sub>O) -SiO<sub>2</sub> 图解  
Fig. 5 (K<sub>2</sub>O + Na<sub>2</sub>O) -SiO<sub>2</sub> diagram

0.52%~3.15%, $\text{K}_2\text{O}$  的含量为 0.23%~1.76%, $\text{TiO}_2$  的含量为 0.29%~1.74%, $\text{CaO}$  的含量为 5.79%~12.9%。

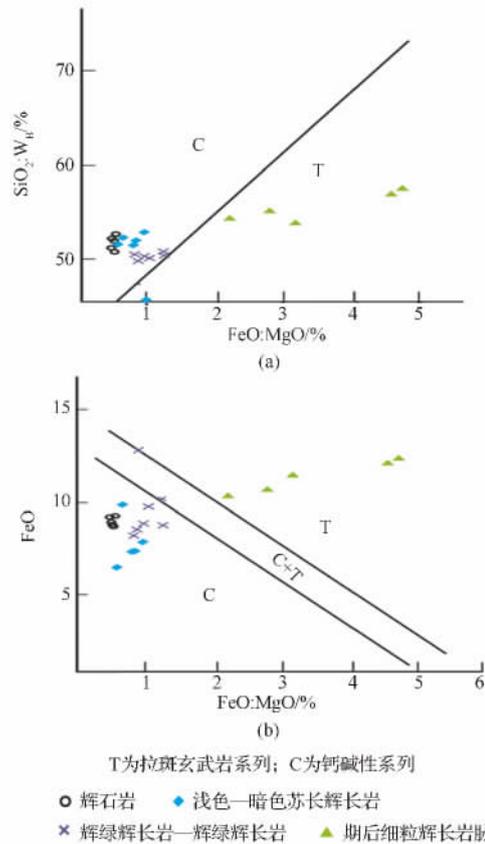


图 6  $\text{FeO}^* / \text{MgO}-\text{SiO}_2$  图解 (Miyashiro, 1974)

Fig. 6  $\text{FeO}^* / \text{MgO}-\text{SiO}_2$  diagram (Miyashiro, 1974)

(1) 在 Bhatia 主量元素哈克图解上<sup>[16]</sup>(图 7),奈恩岩体的浅色-暗色苏长辉长岩、辉绿辉长-辉长辉绿岩和辉石岩的全岩主量元素成分具有相同的变化趋势,随着  $\text{MgO}$  含量的降低, $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$  的含量逐渐升高, $\text{CaO}$  的含量先升高,再

降低,其转折点代表斜长石的大量结晶。此外 SiO<sub>2</sub> 含量和 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(全铁)含量没有明显的变化趋势,说明矿物结晶对这两种元素的影响不太明显。另外,不同的岩相带,其化学成分差异也非常明显,如辉石

岩具有最高的 MgO 含量,苏长辉长岩和辉绿辉长岩次之,后期辉长岩脉的 MgO 含量最低。同样,辉石岩的 TiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 的含量最低,苏长辉长岩次之,后期辉长岩脉最低。

表 1 奈恩岩体主量元素测试结果  
Table 1 Major elements data of the Nairn intrusion

岩石类型	样号	主量元素氧化物含量 ω <sub>B</sub> /%											
		SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI	Total
浅色-暗色 苏长辉长岩	ZK1-005	51.5	0.41	13.85	8.52	0.15	9.32	10.9	2	0.41	0.03	3.17	100.5
	ZK1-053	51.6	0.32	12.6	7.68	0.14	11.35	11.6	1.69	0.19	0.02	2.74	100
	K11-1	52	0.42	14.35	8.55	0.16	8.95	11.2	1.91	0.49	0.03	1.99	100
	K11-11	52.9	0.45	14.65	9.03	0.16	8.37	11.1	1.75	0.49	0.03	1.98	101
	K11-28	45.6	0.44	15.9	12.9	0.18	11.55	6.09	1.44	0.4	0.04	5.29	100
辉石岩	ZK1-473	52.3	0.43	9.09	11	0.17	14.4	7.68	0.96	0.18	0.04	4.59	101
	ZK1-428	52.7	0.43	7.09	10.4	0.19	16	9.36	1.18	0.24	0.03	3.36	101.5
	ZK2-015	50.8	0.37	5.21	9.9	0.18	15.7	10.45	0.71	0.24	0.04	2.9	96.8
	ZK3-011	52	0.35	6.25	10.2	0.19	16.45	9.4	0.86	0.24	0.01	2.99	99.2
	ZK4-001	52.2	0.34	6.18	9.99	0.19	16.65	9.51	0.76	0.24	0.02	2.4	98.8
	ZK5-112	51.2	0.37	6.26	10.1	0.19	17.4	9.67	0.81	0.26	0.03	2.98	99.6
	ZK5-72	52.2	0.35	6.23	10.35	0.2	17.95	9.4	0.55	0.23	0.01	3.19	101
细粒辉 长岩脉	ZK1-069	54.4	1.23	13.9	11.5	0.19	4.82	7.93	3.1	1.12	0.21	1.78	100.5
	ZK1-420	55.2	1.37	13.55	11.85	0.18	3.95	7.37	3.15	1.46	0.23	2.16	100.5
	ZK2-012	57.6	1.74	12.85	13.5	0.2	2.69	5.99	2.7	1.76	0.32	1.29	101
	ZK3-004	57	1.71	12.7	13.25	0.19	2.73	5.79	3.14	1.57	0.32	1.19	99.7
辉绿辉 长岩-辉长 辉绿岩	ZK4-028	53.9	1.55	14.45	12.6	0.19	3.72	6.98	3.08	1.57	0.26	0.79	99.2
	JN11-17	50.8	0.7	14.3	11.3	0.17	8.25	11.4	1.67	0.31	0.06	0.48	99.4
	JN11-18	50.4	0.45	16.4	9.91	0.16	7.17	11	1.9	0.31	0.05	1.28	99
	JN11-20	50.1	0.47	13.2	10.9	0.18	9.4	11.9	1.55	0.25	0.05	0.65	98.7
	JN11-21	50.5	0.45	13	9.36	0.16	10	12.9	1.37	0.31	0.05	1.03	99.2
	JN11-22	50.3	0.51	14.1	10	0.16	9.2	12.3	1.56	0.31	0.06	0.29	98.9
JN11-23	49.8	0.46	13.2	9.69	0.11	9.81	12.4	1.52	0.29	0.06	1.32	98.6	
JN11-24	47.3	0.29	11.6	13.9	0.16	13.9	6.46	0.52	1	0.03	4.12	99.2	

注: JN 系列样品的数据测试由中科院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成,采用方法: Axios PW4400 型 X 荧光光谱仪法,分析浓度范围: ×10<sup>-9</sup>(ppb) - %。其余样品测试由澳实分析检测(加拿大)有限公司完成,采用方法: 硼酸锂融合,电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-AES),所有元素氧化物含量测试精度为 0.01% ~ 100%。

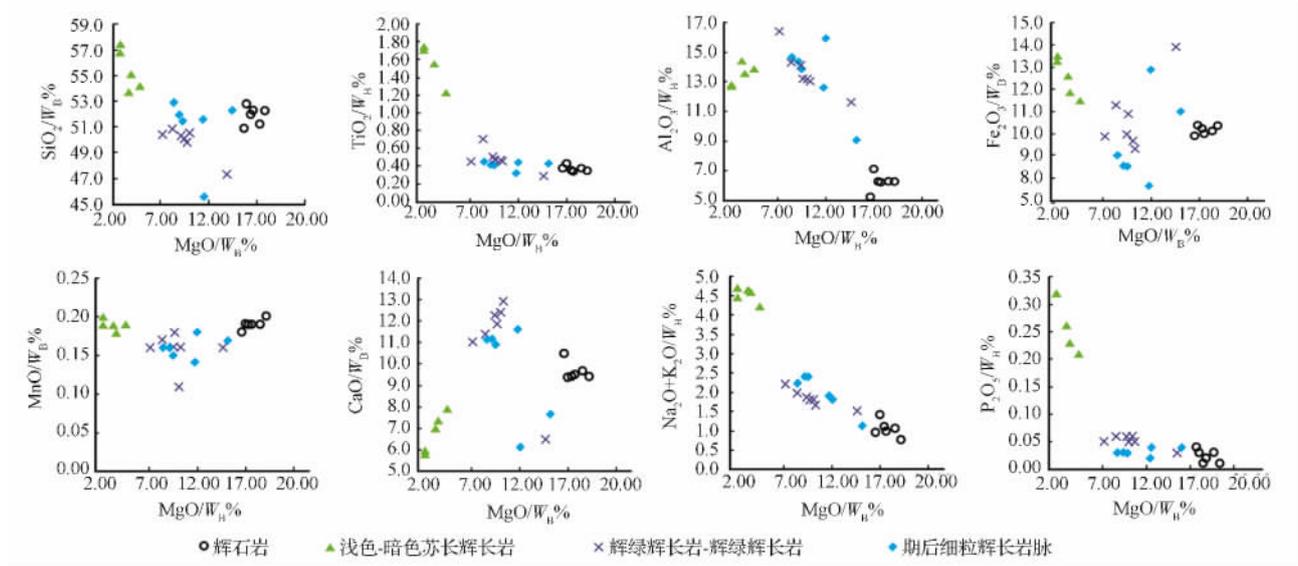


图 7 奈恩岩体主量元素哈克图解

Fig. 7 Major elements Harker diagram of the Nairn intrusion rocks

(2) 岩体细粒辉绿辉长岩-辉长辉绿岩、浅色-暗色苏长辉长岩、细粒辉石岩的化学成分相似,同类物质相的成分也基本一致,这表明奈恩岩体中不同岩相是具有同源关系的<sup>[11]</sup>。而奈恩岩体中分布的细粒辉长岩脉与奈恩岩体不属于同源岩浆形成。岩体的总平均成分接近于辉长岩的成分,这和造岩矿物的平均含量是一致的。

(3) 根据张雯华等人的镁铁比值 ( $Mg / < Fe >$ ) 对基性度 ( $(Mg + < Fe >) / Si$ ) 的变异图<sup>[17]</sup> (图8),可见奈恩岩体的辉石岩、苏长辉长岩、辉绿辉长-辉长辉绿岩及期后辉长岩脉等岩石主要落在铁质区,少数落入铁镁质区。这反映奈恩岩体与阿拉斯加型镁铁-超镁铁岩体及层状或似层状组合类型镁铁-超镁铁岩体的特征类似。

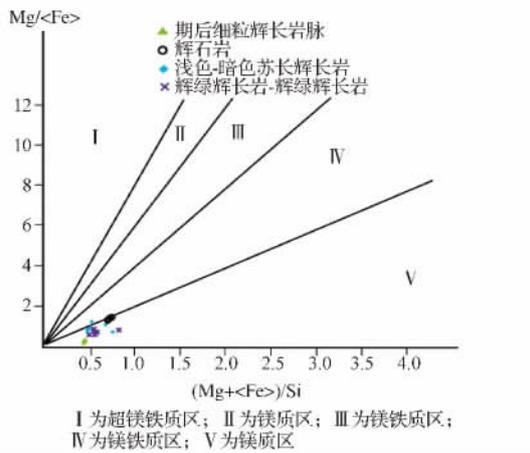


图8  $Mg / < Fe >$  对  $(Mg + < Fe >) / Si$  的变异图  
Fig. 8  $Mg / < Fe >$  -  $(Mg + < Fe >) / Si$  variation diagram

(4) 运用 Pearce and Stanley 的  $(Mg + Fe) / Si - Si / Ti$  摩尔比值图可以判定控制岩石成分的矿物相<sup>[18]</sup>。奈恩岩体中各岩相  $Si / Ti$  和  $(Mg + Fe) / Si$  变化范围分别为 50 ~ 150 和 0 ~ 100 (图9),其中辉石岩的  $Si / Ti$  和  $(Mg + Fe) / Si$  变化范围分别为 100 ~ 150 和 50 ~ 100; 辉绿辉长-辉长辉绿岩的  $Si / Ti$  和  $(Mg + Fe) / Si$  变化范围分别为 50 ~ 100 和 0 ~ 50; 苏长辉长岩的  $Si / Ti$  和  $(Mg + Fe) / Si$  变化范围分别为 70 ~ 150 和 40 ~ 80; 期后辉长岩脉的  $Si / Ti$  和  $(Mg + Fe) / Si$  变化范围分别为 0 ~ 50 和 0 ~ 50。从图中可以看出奈恩岩体中苏长辉长岩、辉绿辉长岩-辉长辉绿岩以及后期辉长岩脉成分主要受斜长石、单斜辉石结晶控制,辉石岩则主要受单斜辉石结晶控制。

(5) 根据张雯华等人的  $(Na_2O + K_2O)$  对  $SiO_2$  变异图<sup>[17]</sup> (图10) 可以看出,该岩体中苏长辉长岩和辉绿辉长-辉长辉绿岩多数落在弱碱质区,少数落在碱质区偏弱碱区域,而期后的辉长岩脉则落在碱质区上方。这反映出岩体在总体上是属于弱碱质-

贫碱质的。同时,岩体中碱性组分与  $SiO_2$  呈正消长关系,反映出碱性组分在岩石中主要是与  $SiO_2$  形成铝硅酸盐矿物<sup>[11]</sup>。岩石中  $Na_2O > K_2O$ ,  $Na_2O / K_2O$  为 0.52 ~ 8.89,一般介于 2 ~ 6 之间,含矿岩相岩石中的  $Na_2O / K_2O$  比值一般低于不含矿岩石比值。

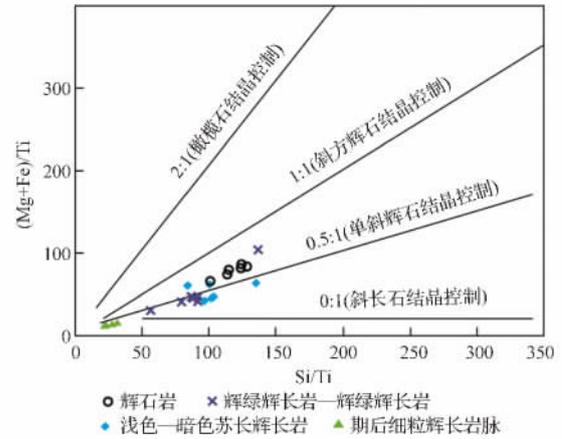


图9  $(Mg + Fe) / Ti - Si / Ti$  图解  
Fig. 9  $(Mg + Fe) / Ti - Si / Ti$  diagram

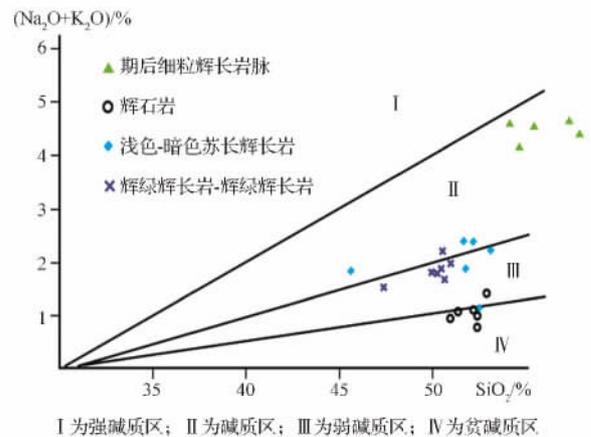


图10  $(Na_2O + K_2O)$  对  $SiO_2$  变异图  
Fig. 10  $(Na_2O + K_2O) - SiO_2$  variation diagram

(6) 由张雯华等人的  $Al_2O_3$  对  $SiO_2$  的变异图<sup>[17]</sup> (图11) 可以看出,除了辉石岩落在贫铝质区外,其他所有岩石都落在低铝质区。

(7) 张雯华等人的 FMC 图解是将岩体内各类岩石中镁、全铁及钙的重量百分数换算成三者的原子百分数后,在以 F (全铁)、M (镁) 及 C (钙) 为正三角形顶端的图上投影而作出的<sup>[17]</sup> (图12)。由图可以看出岩体中大部分岩石落在贫钙的镁铁质区的上部,少数落在贫钙的铁镁质区下部。期后形成辉长岩脉落在贫钙铁镁质区中上部。由图8 ~ 图12可知,奈恩岩体属于分异性良好的岩墙状侵入体,属于镁铁质-铁镁质、低铝、弱碱质和低钙(贫钙)岩体。这与国内外含铜、镍、铂族元素矿化或矿床的岩体较

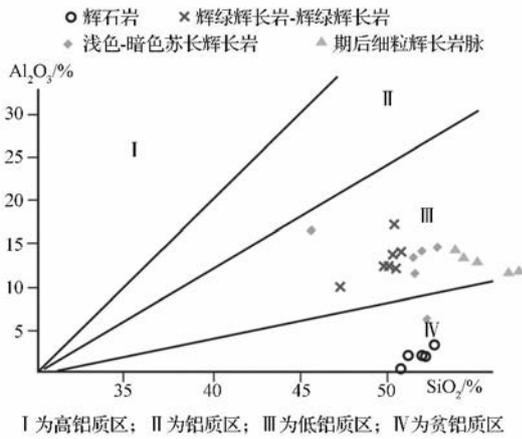


图 11 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>对SiO<sub>2</sub>变异图

Fig. 11 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> variation diagram

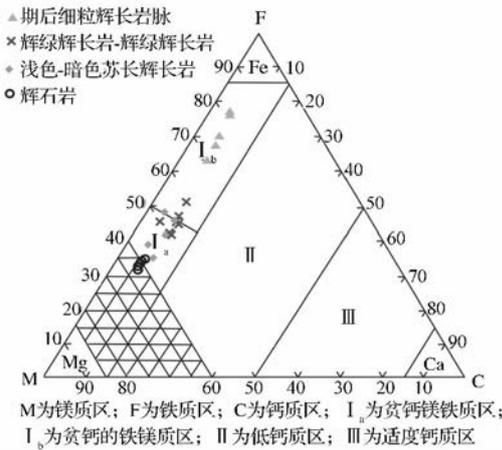


图 12 FMC 图解

Fig. 12 FMC diagram

为一致<sup>[9]</sup>。

(8) TiO<sub>2</sub>在岩体的各类岩石中含量很低,但呈有规律的变化,随着岩石基性程度的降低而略有增加。但期后的辉长岩脉 TiO<sub>2</sub>含量虽然也是增加趋势,但是增加幅度与岩体中其他岩石明显不同。

### 6 成矿机制

根据奈恩岩体地质特征、岩相学特征认为,奈恩岩体属于浅成侵入相产物,是岩浆上侵到地表浅部后,在岩浆通道内进行多项岩浆分异作用的产物<sup>[19, 20]</sup>。同时,由于围岩混染作用提供了大量的硫元素,促使岩浆硫饱和,熔离出含硫不混溶岩浆<sup>[21, 22]</sup>,进而形成铜镍硫化物富集。在岩浆分异过程中,岩浆房内的双扩散对流作用对岩浆分异及含硫熔浆的熔离都起了重要作用。这里将奈恩地区成矿机制概括为四个岩浆演化过程(图 13)。

(1) 富含 Cu-Ni 等金属元素的玄武质岩浆沿休

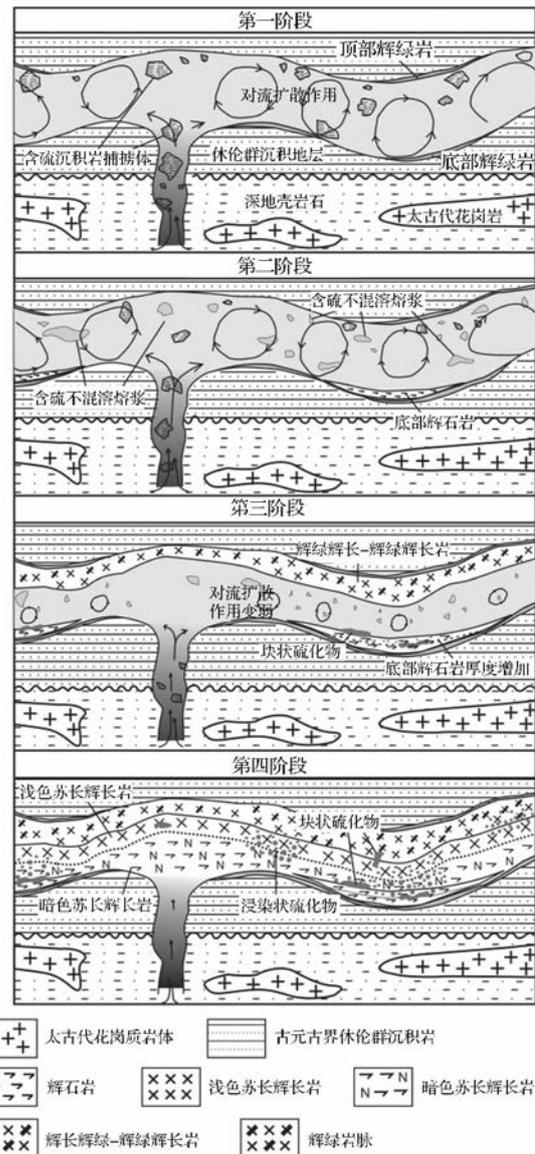


图 13 奈恩矿床成矿模式图

Fig. 13 Metallogenic model of the Naim Deposit

伦统变质砂岩地层内深大断裂侵位至地表浅部,形成席状或缓倾状的岩浆房<sup>[9, 10, 19]</sup>。由于顶底板岩浆和中央的岩浆房冷热不均,在岩浆房内部形成很强的岩浆扩散对流作用。岩浆侵位过程中和岩浆对流作用过程中,均有大量休伦统围岩长石石英砂岩进入岩浆房。由于长石、石英的熔融点较低,围岩捕掳体开始熔融。同时,岩浆房顶底板与围岩迅速变冷,在顶底部分别形成薄层辉绿岩。

(2) 岩浆房内开始少量结晶分异作用,结晶析出辉石、斜长石和极少量橄榄石。由于岩浆房内继续着较强的岩浆扩散对流,加上重力分异作用,使密度较大的辉石和橄榄石趋向于沉淀到岩浆房底部,形成了厚度不均匀的细粒辉石岩<sup>[19]</sup>。由于第一阶段和第二阶段的大量含硫围岩进入岩浆房,发生了

强烈的混染作用,这为岩浆提供了足够多的硫元素,以致岩浆中硫元素达到饱和,形成了含硫化物的不混溶岩浆<sup>[21-22]</sup>。同样,由于岩浆房内的扩散对流作用和重力分异作用,不混溶的含硫熔浆也有部分沉淀到底部,但此时的含硫熔浆分布并不是很均匀。在此过程中,体积较小的围岩熔融体由于岩浆内对流作用而被侵蚀,但是体积较大的熔融体依然有部分保留下来。由于围岩熔融体密度较小,被侵蚀后保留下来的熔融体逐渐向岩浆房顶部富集,形成了镁铁质岩浆与围岩熔融体之间的扩散对流。这样,岩浆房内就行了双扩散对流作用。双扩散对流作用会促进围岩混染作用,加速岩浆硫饱和,进而形成更多的含硫不混溶岩浆。

(3) 仍有部分捕掳体继续被熔融,但岩浆房内双扩散对流作用已经很微弱。富集在岩浆房顶部围岩熔融体开始形成细晶岩脉。岩浆房上部开始结晶形成辉绿辉长-辉长绿岩相。岩浆房底部辉石岩厚度略有增加,顶底部辉绿岩厚度基本没有发生变化。同时,岩浆房内已经形成大量含硫不混溶岩浆,由于岩浆自身的扩散对流作用减弱,含硫熔浆更多进行了重力分异作用,不断向底部沉淀富集,最终在前期的辉石岩上形成层状、透镜状块状铜镍硫化物。

(4) 岩浆内双扩散对流作用基本停止,岩浆房中部形成浅色-暗色苏长辉长岩。由于重力分异作用,宏观总体上密度略小的浅色苏长辉长岩位于密度稍大的暗色苏长辉长岩之上,但二者并没有明显过渡带,局部往往是相互包含。岩浆房上部的辉绿辉长岩-辉长辉绿岩和下部辉石岩基本结晶完成。此外,整个岩浆作用过程中,岩浆房顶底板的围岩发生了不同程度的变质作用。此过程中,仍有大量含硫熔浆来不及进行重力分异到岩浆房底部,从而和苏长辉长岩一起凝固结晶,形成浸染状铜镍硫化物分布在苏长辉长岩内。在纵向上,硫化物分布仍然反映其进行了一定重力分异作用,下部硫化物含量更高,呈稠密浸染状。反之,向上含量减少。

(5) 以上建立的岩体和铜镍硫化物形成机制与所观察的地质现象是一致的。在岩体的顶部岩浆混染作用更强,但铜镍硫化物矿化较弱。相反,岩体下部和底部的岩浆混染作用较弱,但铜镍硫化物较富集。这是由于在岩浆房的入口位置,大量的涡流岩浆进入岩浆房,破坏了岩相界面形成所需的物理条件,所以这里很难发生岩浆的同化混染作用<sup>[19]</sup>。

## 7 讨论

(1) 加拿大萨德伯里奈恩地区岩体分异性良好,岩相分带清晰,从顶部至底部依次为:顶部辉绿

岩、上部辉绿辉长岩-辉长辉绿岩、中部浅色-暗色苏长辉长岩、下部辉石岩、底部辉绿岩。

(2) 根据岩石地球化学研究,奈恩地区岩体中各岩石单元属于钙碱性系列、镁铁质-铁镁质、低铝、弱碱质和低钙(贫钙)岩体。

(3) 奈恩地区苏长辉长岩和辉石岩的接触带部位发育大量铜镍硫化物,说明铜镍硫化物熔离作用是在辉石结晶分异后发生的。辉石结晶分异捕获了岩浆中了大量铁元素,这能够促进残余岩浆中硫元素溶解度降低,进而导致硫化物在岩浆中发生过饱和,并熔离成矿<sup>[23]</sup>。

(4) 岩浆房内双扩散对流作用对本区铜镍硫化物成矿过程具有重要意义。该作用能促使岩浆房内岩浆混染作用和岩浆分异作用快速完成,使硫化物熔浆在较短时间内达到过饱和,从而实现硫化物熔离、沉淀、富集成矿。

## 参 考 文 献

- 1 Krogh T E, Davis D W, Corfu F. Precise U-Pb zircon and baddeleyite ages for the Sudbury area; in the geology and ore deposits of the Sudbury Structure. Ontario Geological Survey, 1984; 1: 431-446
- 2 Krogh T E, Kamo S L, Bohor B F. Shocked metamorphosed zircons with correlated U-Pb discordance and melt rocks with concordant protolith ages indicate an impact origin for the Sudbury Structure. Canada: American Geophysical Union, Geophysical Monograph, 1996; 95: 343-352
- 3 Corfu F, Andrews A. A U-Pb age for mineralized Nipissing diabase, Gowganda, Ontario. Canadian Journal of Earth Sciences, 1986; 23: 107-112
- 4 Sproule R A, Sutcliffe R, Tracaneli H. Palaeoproterozoic Ni-Cu-PGE mineralization in the Shakespeare intrusion, Ontario, Canada: a new style of Nipissing gabbro-hosted mineralization. Applied Earth Science (Trans Inst Min Metall B), 2007; 116 (4): 188-200
- 5 Jobin-Bevans L S, MacRae N D, Keays R R. Cu-Ni-PGE potential of the Nipissing diabase. Canada: Ontario Geological Survey, Miscellaneous Paper, 1998; 169: 220-223
- 6 Jobin-Bevans L S, Keays R R, MacRae N D. Cu-Ni-PGE in Nipissing Diabase: results from surface and core samples. Canada: Ontario Geological Survey, 1999; Open File Report 6000: 33-4-33-5
- 7 Jobin-Bevans L S. Platinum-group mineralization in Nipissing gabbro intrusions and the River Valley intrusions, Sudbury Region, Ontario. London, Ontario: University of Western Ontario, 2004: 573
- 8 Lightfoot P C, De Souza H, Doherty W. Differentiation and source of Nipissing Diabase intrusions, Ontario, Canada. Canadian Journal of Earth Sciences, 1993; 30: 1123-1140
- 9 Lightfoot P C, Naldrett A J. Petrology and geochemistry of the Nipissing Gabbro: exploration strategies for nickel, copper, and platinum group elements in a Large Igneous Province. Ontario Geological Survey, 1996; Study 58: 4-8
- 10 Lightfoot P C, Naldrett A J. A field guide to the geology of Sudbury, Ontario. Ontario Geological Survey, Open File Report 2009; 6243: 31-36
- 11 汤中立,李文渊. 金川铜镍硫化物(含铂)矿床成矿模式及地质

- 对比. 北京: 地质出版社, 1995: 44, 110  
Tang Z L, Li W Y. Metallogenic model and geological comparison of Jinchuan copper-nickel (PGE) sulphide deposit. Beijing: Geological Publishing House, 1995: 44, 110
- 12 汤中立, 任端进. 中国硫化镍矿床类型及成矿模式. 地质学报, 1987; (4): 350—361  
Tang Z L, Ren D J. Types and metallogenetic models of nickel sulfide deposits China. Acta Geologica Sinica, 1987; (4): 350—361
- 13 黄杰, 刘耀辉, 莫江平. 桂北宝坛地区铜镍硫化物矿床成矿模式. 矿产与地质, 2007; 21(4): 425—428  
Huang J, Liu Y H, Mo J P. Metallogenic model of copper-nickel sulfide deposit in Baotan area, Northern Guangxi. Mineral Resources and Geology, 2007; 21(4): 425—428
- 14 刘月星. 铜镍硫化物矿床成矿作用及成矿模式研究. 矿产与地质, 1997; 11(4): 225—231  
Liu Y X, Tang H S, Wu H Z. Mineralization and metallogenetic model of copper-nickel sulphide deposit. Mineral Resources and Geology, 1997; 11(4): 225—231
- 15 路风香, 桑隆康. 岩石学. 北京: 地质出版社, 2001: 35—37  
Lu F X, Sang L K. Petrology. Beijing: Geological Publishing House, 2001: 35—37
- 16 杨学明, 杨晓勇, 陈双喜. 岩石地球化学. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2000: 58, 62  
Yang X M, Yang X Y, Chen S X. Petrogeochemistry. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 2000: 58, 62
- 17 张雯华, 从柏林. 一种简单的镁铁质超镁铁质岩岩石化学研究方法. 科学通报, 1976; (4): 179—183  
Zhang W H, Cong B L. A simple method for chemical study of the mafic-ultramafic rocks. Chinese Science Bulletin, 1976; (4): 179—183
- 18 Pearce T H, Stanley C R. The validity of pearce element ratio analysis in petrology: an example from the Uwekahuna laccolith, Hawaii. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1991; 108(1): 212—218
- 19 Lightfoot P C, Naldrett A J. Assimilation and crystallization in basic magma chambers: trace-element and Nd-isotopic variations in the Kerns sill, Nipissing diabase province, Ontario. Can J Earth Sci, 1989; 26: 737—754
- 20 汤中立, 钱壮志, 姜常义, 等. 中国镍铜铂岩浆硫化物矿床与成矿预测. 北京: 地质出版社, 2006: 15—18  
Tang Z L, Qian Z Z, Jiang C Y, et al. Magmatic Ni-Cu-PGE sulfide deposits and metallogenetic prognosis in China. Beijing: Geological Publishing House, 2006: 15—18
- 21 Song X Y, Zhou M F, Wang C Y, et al. Role of crustal contamination information of the Jinchuan intrusion and its world-class Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit, northwest China. International Geology Review, 2006; 48: 1113—1132
- 22 Lehmann J, Arndt J, Windley B, et al. Field relationships and geochemical constraints on the emplacement of the Jinchuan Intrusion and its Ni-Cu-PGE sulfide deposit, Gansu, China. Economic Geology, 2007; 102: 75—94
- 23 周超凡, 石准立, 林新多, 等. 矿床地质学. 北京: 地质出版社, 1976: 65  
Zhou C F, Shi Z L, Lin X D, et al. Geology of ore deposit. Beijing: Geological Publishing House, 1976: 65

## The Characteristics of Mafic-ultramafic Intrusion and Metallogenic Mechanism in the Nairn Area, Sudbury, Canada

XU Ying-hong<sup>1,2</sup>, WANG Jing-bin<sup>2</sup>, SONG Xie-yan<sup>3</sup>, WANG Xiang-lan<sup>4</sup>, CHEN Lie-meng<sup>3</sup>, YU Song-yue<sup>3</sup>  
(China University of Geosciences (Beijing)<sup>1</sup>, Beijing 100083 P. R. China; Beijing Institute of Geology for Mineral Resources<sup>2</sup>, Beijing 100012, P. R. China; Institute of Geochemistry Chinese Academy of Sciences<sup>3</sup>, Guizhou 550002, P. R. China; China Non-ferrous Metals Resource Geological Survey<sup>4</sup>, Beijing 100012, P. R. China)

**[Abstract]** There is a kind of Cu-Ni sulfides deposits in the Sudbury region, Canada, the Shakespear deposit and Nairn deposit as a typical, which are controlled by the Nipissing mafic-ultramafic intrusive suite and unrelated to the Sudbury meteorite impact. The Nairn intrusion exposed I and II blocks, as dikes in NE toward, on the surface, which combined into a whole in deep. Magma differentiation was good in Nairn property, which exhibits clear lithofacies belts from the bottom to the top. Massive-semi massive sulfides distributed in the lower of pyroxenite; disseminated sulfides distributed in the middle part of norite-gabbro. Most of the rock units in the Nairn intrusion belong to the calc-alkaline series. According to the (Mg / < Fe >) on (Mg + < Fe >) / Si variation diagram, (Mg + Fe) / Ti-Si / Ti diagram, (Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O) on SiO<sub>2</sub> variation diagram, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on SiO<sub>2</sub> variation diagram, FMC diagram, the Nairn intrusion exhibited mafic-femic, low aluminum, weak-alkalic and low calcium (poor in calcium). Metallogenic mechanism in the Nairn area can be summarized into four magma evolution phases. Contamination of sulfur wall-rock and development of a double-diffusive interface (DDI) play an important role in the first and second phase for magmatic differentiation and isolating of sulfur-magma. Cu-Ni sulfides deposition was completed in the third and fourth phase.

**[Key words]** Sudbury Nairn intrusion lithofacies belts Cu-Ni sulfides magmatic differentiation metallogenic mechanism